

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05510

研究課題名(和文)大規模燃焼解析手法の構築

研究課題名(英文)Construction of large-scale numerical analysis methods for combustion

研究代表者

森井 雄飛 (Morii, Youhi)

早稲田大学・次世代自動車研究機構・次席研究員

研究者番号：50707198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,100,000円

研究成果の概要(和文)：詳細化学反応機構を用いた燃焼解析を実現するために高速化手法の開発及び組込を実施した。また、開発したコードを用いて実験値との比較を実施した。

まず、大規模燃焼解析コードにおいて最も解析負荷の大きな化学反応方程式の解法について、陽解法及び陰解法の実装を実施した。本手法は従来法と同等の精度を保持しつつ、数百倍の高速化を実現した。また、解析負荷のさらなる低減を目指し、Artificial Thickened Flame法と解適合格子法を導入して格子点数を大幅に削減することに成功した。

本研究で開発したコードを用いて2次元実験室スケールの解析を実施し、実験とよく一致する結果を得ることを可能とした。

研究成果の概要(英文)：In order to realize the combustion analysis using detailed chemical kinetic models, the development and implementation of the high speed method was carried out. In addition, I compared the experimental values using developed code.

First, I developed the explicit and implicit methods for solving the chemical reaction equation, which have main computational cost in the combustion simulation. These methods achieve speedup several hundred times while maintaining the same precision as the conventional method. I also succeeded in drastically reducing the number of grid points by implementing the Artificial Thickened Flame method and the Adaptive Mesh Refinement method to further reduce the computational cost.

By using the code developed in this research, the calculations are carried out on the two-dimensional laboratory scale, and it was able to obtain the results that are in good agreement with the experiment.

研究分野：燃焼

キーワード：燃焼解析

1. 研究開始当初の背景

燃焼現象の基礎研究だけでなく、実用解析においても詳細化学反応機構を用いた解析が重要視されている。しかし、解析負荷の問題から、燃焼現象の詳細を知ることができる詳細化学反応モデルと数値流体解析と組み合わせた数値解析はあまり実施されておらず、実用的に利用するには解析負荷の低減が必要である。

2. 研究の目的

詳細化学反応機構を用いた数値流体解析を実現するため、解析手法の効率化を実施する。また、高効率化手法を組み込んだ解析コードを用いて実験室スケールの解析を実施し、実験を再現可能であることを示す。

3. 研究の方法

詳細化学反応機構を用いた数値流体解析を実施し、解析負荷の詳細を調査する。解析負荷の調査結果から、負荷の高い部分を高速化する手法の開発又は既存の手法の組み込みを実施する。次に、解析負荷低減のため、格子点数を削減する方法を調査し、解析コードへの組み込みを実施する。

4. 研究成果

高速積分法の開発

詳細化学反応モデルと数値流体解析をカップルした際に問題となる化学反応方程式の陽的高速解法である Extended Robustness Enhanced Numerical Algorithm (ERENA)法の適応可能領域を調査した。結果として、化学種が少ない場合や、硬直性が非常に強い条件では速度が低下する結果が得られた。そこで、Dual Time Stepping method を用いた解法 (DTS) を新たに開発した。開発した手法は陰解法であるため安定性が向上し、特に硬直性の強い条件下では ERENA と比較して良好な結果が得られることが分かった。(図1)

格子点削減手法の導入

Artificial Thickened Flame(ATF)法を用いた解析を実施し、その適応可能性について調査を行った。比較に用いたのは衝撃波と火炎の相互干渉問題である。ATF を用いた解析では、格子解像度が少ない条件であっても、火炎を十分な格子点で解像することが可能となり、ATF を用いない解析で格子解像度が高い際に見られる現象が再現できることが分かった。(図2, 3)

さらなる格子数の削減を目指し、解適合格子法を解析コードに組み込んだ。結果として、格子点数の削減だけではなく、ロードバランスの向上にもつながることを示すことができた。(図4)

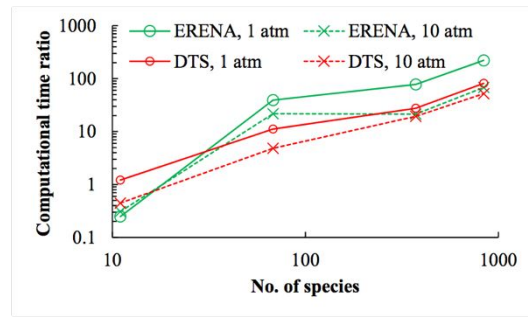


図1. 時間刻み幅  $10^{-7}$  s での VODE に対する解析速度比。1 以上であれば VODE よりも高速。(MTS はよく使われる陽的積分法, DTS は本研究で得られた結果)

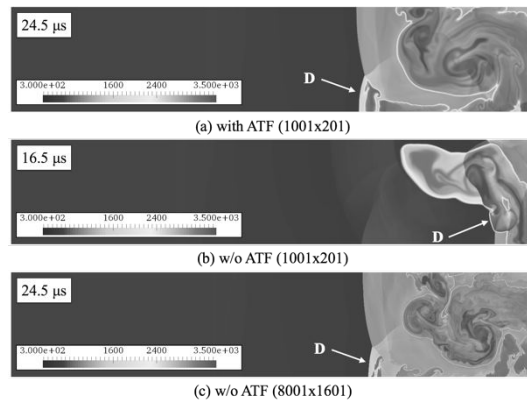


図2. ATF 無しで格子収束した結果(c)との比較。(ATF 有りでは8倍ほど格子幅を大きくできる。)

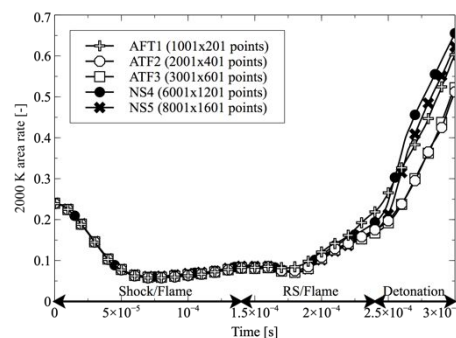
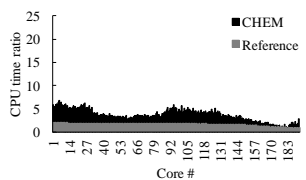
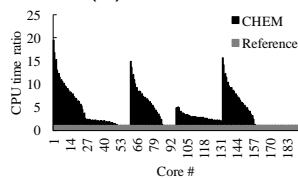


図3. 2000 K 以上の領域の面積を比較した結果。(ATF を使うと格子収束性が上昇する。)



(a) w/ AMR



(b) w/o AMR

図4. 各コアでの解析時間比.(AMR 有りの結果(a)は理想値である Reference 値に近いが, AMR 無しの結果(b)は Reference 値と比べて大きな値を示しており, ローとバランスが悪いことが分かる.)

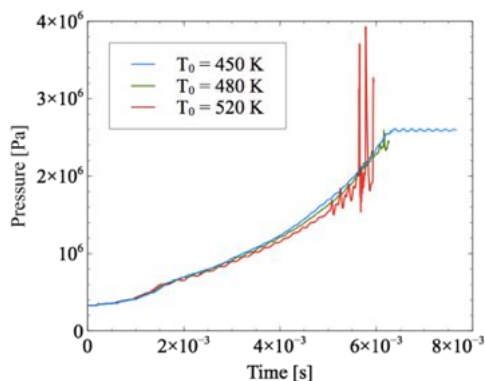


図5. 解析で得られた圧力履歴(大きなピークを持った結果はノッキングの発生を表す.)

#### 実験との比較

で高速化した解析コードを用いて, 実験との比較を実施した. 解析対象としたのは, 公開文献となっているノルマルヘプタン燃料を用いた定容容器内にてスパーク点火させる実験であり, 初期温度によってエンジン・ノックの発生有無を調査したものである. 本比較は火炎伝播速度を正確に見積もる必要があるだけでなく, 着火タイミングを合わせるためには低温酸化反応も正確に捉える必要がる為, 多数の化学種を持つ化学反応モデルを用いた数値解析が必要であり, 高効率化されていないコードでは 非常に困難が予測されるターゲットである為, この様な大規模な解析が必要となるケースでの実験との比較に実現した研究は申請者の知見では存在しない. そこで, 本研究で開発を実施した高効率な解析コードを用いて実現することとした. 本研究で作成したコードでは, の高速化によって 100 倍程度の高速化, の Artificial Thickened Flame 法によって数十倍の高速化及び Adaptive mesh Refinement 法を用いることで数十倍の高速化を可能と

し, トータルとして数万倍のコスト削減を実施したものである. 結果として 2 次元解析ではあるもののノック発生条件を概ね実験と一致させることが可能となった. (図5)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Youhi Morii, Hiroshi Terashima, Mitsuo Koshi, Taro Shimizu, Eiji Shima, ERENA: A fast and robust Jacobian-free integration method for ordinary differential equations of chemical kinetics, Journal of Computational Physics, Vol. 322, 2016, pp. 574-558, 10.1016/j.jcp.2016.06.022

〔学会発表〕(計 4 件)

森井 雄飛, 溝淵 泰寛, 松尾 裕一, 2次元定容容器におけるノッキングの数値流体解析, 第49回流体力学講演会/第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2017

森井 雄飛, 松尾 裕一, 詳細反応機構を用いた数値流体解析における解適合格子法の有用性, 第54回燃焼シンポジウム, 2016

森井雄飛, 寺島洋史, 清水太郎, 青野淳也, 爆燃・爆轟伝播現象に対する ATF/詳細反応機構を用いたモデリング, 第53回燃焼シンポジウム, 2015

Eiji Shima, Youhi Morii, Dual Time Stepping Method for Chemical Kinetics ODEs, 9<sup>th</sup> Mediterranean Combustion Symposium, 2015

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森井 雄飛 (MORII, Youhi)

東北大学・流体化学研究所・助教

研究者番号：50707198

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

( )